



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Optimalizace 3D tisku SLS technologií

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Zoltán Dolenský**
Vedoucí práce: Ing. Jan Koprnický, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Optimization of 3D printing using SLS technology

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems
Author: **Zoltán Dolenský**
Supervisor: Ing. Jan Koprnický, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Optimalizace 3D tisku SLS technologií

Jméno a příjmení: **Zoltán Dolenský**
Osobní číslo: M15000086
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s SLS technologií 3D tisku.
2. Proveďte rešerši optimalizace návrhu modelů a strategií při SLS 3D tisku.
3. S použitím Matlabu navrhnete optimalizované umístění modelu do tiskového prostoru s ohledem na velikosti ozářené plochy.
4. Navržené řešení prakticky otestujte na SLS tiskárně Lisa 2.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] STEEN, William a Jyotirmoy MAZUMDER. Laser Material Processing. 4. London: Springer-Verlag London, 2010. ISBN 978-1-84996-061-8.
- [2] RICHARDOT, Amandine. Our best tips to optimize your designs for 3D printer powder removal. Sculpteo, 3D Printing Services [online]. Mar 26, 2018 [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/03/26/our-best-tips-to-optimize-your-designs-for-3d-printer-powder-removal/>
- [3] BOURELL, David L., Trevor J. WATT, David K. LEIGHT a Ben FULCHER. Performance Limitations in Polymer Laser Sintering. Physics Procedia. 2014, 2014(56), 147–156. ISSN 1875-3892.

Vedoucí práce: Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace
Datum zadání práce: 10. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2019

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci 10. října 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

30. 4. 2019

Zoltán Dolenský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Janovi Koprnickému, PhD. za cenné rady a trpělivost.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Šafkovi, PhD., Ing. Michalovi Ackermannovi, PhD. a Bc. Jakubovi Macháčkovi za uvedení do laboratoře prototypových technologií, výpomoc při práci v ní a odborné poradenství při vypracování této práce.

Mé díky patří také Ing. Radomíru Mendřickému, PhD. z laboratoře 3D měření a digitalizace za pořízení 3D skenů testovacích výtisků.

Abstrakt

Cílem této práce je vývoj optimalizačního algoritmu pro technologii Selective Laser Sintering (SLS), jehož vstupem je libovolný 3D model ve stereolitografickém formátu STL. Pro vývoj je použit nástroj Matlab. Implementovaný algoritmus navrhne optimální natočení 3D modelu pro dosažení co nejvyšší rozměrové přesnosti a kvality výtisku. Realizace testovacích výtisků je provedena na SLS tiskárně Sinterit Lisa Pro a následné ověření rozměrové přesnosti výtisků proběhlo na 3D skeneru Atos Triplescan.

Klíčová slova

3D tiskárna, virtuální model, optimalizace, Matlab, algoritmus

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to develop an optimization algorithm for Selective Laser Sintering (SLS) technology, whose input is any 3D model in stereolithographic (STL) format. The Matlab tool is used for development. The implemented algorithm suggests optimal 3D model rotation to achieve the highest dimensional accuracy and print quality. The implementation of test prints is performed on the Sinterit Lisa Pro SLS printer and subsequent verification of the dimensional accuracy of the prints was performed on the Atos Triplescan 3D scanner.

Keywords

3D printer, virtual model, optimization, Matlab, algorithm

Obsah

1	ÚVOD	10
2	RAPID PROTOTYPING	11
2.1	Pre-processing	11
2.2	Processing	12
2.3	Post-processing	12
2.4	Princip odejmutí podpurných konstrukcí	13
3	NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIE	14
3.1	SLA	14
3.2	FFF	15
3.3	PolyJet	16
3.4	Multi Jet Fusion	17
3.5	SLS	18
4	REALIZACE POLOHOVACÍHO ALGORITMU	19
4.1	Problematika polohování dílu pro tisk pomocí SLS	19
4.2	Použité zařízení – Sinterit Lisa Pro	20
4.3	Materiály dostupné pro Lisa Pro	21
4.4	Analýza testovacích výtisků	22
4.5	Formát STL	24
4.6	Implementace polohovacího algoritmu	26
4.7	Načtení STL souboru a slicing dle nastavené výšky	28
4.8	Testování algoritmu na prakticky využitelných dílech	34
4.9	Porovnání rozměrové přesnosti testovacích výtisků	38
4.10	Srovnání rozměrové přesnosti konstrukčního dílu 3D tiskárny	39
4.11	Srovnání rozměrové přesnosti topologicky optimalizovaného dílu	40
5	ZÁVĚR	41
6	CITOVANÁ LITERATURA	42
7	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	43

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Princip technologie SLA [10]	14
Obrázek 2 – Princip technologie FFF [10]	15
Obrázek 3 – Princip technologie PolyJet [10]	16
Obrázek 4 – Princip technologie Jet Fusion [10]	17
Obrázek 5 – Princip technologie SLS [10]	18
Obrázek 6 – Čelní pohled na tiskárnu Lisa Pro [17]	20
Obrázek 7 – Výtisk bez polohování (výrazná deformace na spodní straně)	22
Obrázek 8 – Druhá metoda polohování	23
Obrázek 9 – Třetí metoda polohování (občasné nedokonalosti povrchu způsobené chybou tiskárny)	24
Obrázek 10 – Blokové schéma první verze algoritmu	27
Obrázek 11 – Blokové schéma druhé verze algoritmu	28
Obrázek 12 – Vrstvy modelu krychle po slicing (slice_height = 1)	29
Obrázek 13 – Aproximace průběhu plochy modelu při tisku	31
Obrázek 14 – Optimální poloha krychle pro tisk pomocí SLS	34
Obrázek 15 – Princip nestingu [20]	35
Obrázek 16 – Díl po montáži (FFF)	36
Obrázek 17 – CAD model dílu	36
Obrázek 18 – Průběh plochy vrstev	36
Obrázek 19 – Optimální poloha při tisku	36
Obrázek 20 – Topologicky optimalizovaný model pedálu	37
Obrázek 21 – Optimální poloha při tisku	37
Obrázek 22 – Průběh plochy vrstev	37
Obrázek 23 – Shora: Model konstrukčního dílu polohovaný ručně a s použitím algoritmu	39
Obrázek 24 – Shora: Model pedálu polohovaný ručně a s použitím algoritmu	40

Seznam zkratk

SLS – Selective Laser Sintering
FFF – Fused Filament Fabrication
CAD – Computer Aided Design
CAM – Computer Aided Manufacturing
STL – Stereolithography

1 Úvod

Technologie 3D tisku se ve světě vyvíjí již od 80. let minulého století a v posledních letech lze dokonce zaznamenat snahu o zapojení některých z těchto technologií i do procesu průmyslové sériové výroby. V budoucnu by mohly aditivní procesy plně nahradit dnes již klasickou subtraktivní metodu. Primárním využitím technologií 3D tisku je však v dnešní době snadná výroba prototypů. S nástupem digitalizace vývojového procesu produktů a využití CAD software se 3D tisk nabízí jako nejrychlejší a nejefektivnější způsob realizace jednoho kusu nebo malé série prototypů pro průběžné testování výrobku během procesu vývoje [1].

Jednou z mnoha metod 3D tisku je také Selective Laser Sintering (SLS). Jedná se o proces vypalování jednotlivých vrstev výtisku do nanášeného prášku laserem. Tato technologie je poměrně oblíbená, jelikož se hodí na tisk komplikovaných struktur a topologicky optimalizovaných dílů. Stejně jako u každé jiné technologie však existují určitá pravidla, jenž je nutné pro dosažení kvalitního výtisku dodržet [2].

V této práci jsou zmíněny v dnešní době nejpoužívanější technologie 3D tisku a jejich výhody či nevýhody právě proti technologii SLS. Dále se práce zabývá problematikou polohování virtuálního modelu do tiskového prostoru tak, aby byla dosažena co nejlepší kvalita výtisku. Součástí práce je software sloužící k analýze vstupních dat pro 3D tiskárnu a návrhu neoptimálnější kombinace natočení modelu dle osy X a Y v kartézském souřadném systému. Pro testování algoritmu byla použita SLS tiskárna Sinterit Lisa Pro.

2 Rapid prototyping

Rapid prototyping (RP) je obor zabývající se rychlou produkcí fyzických objektů z virtuálního modelu za pomoci jedné z aditivních metod výroby, 3D tisku. Jedná se o mnohem rychlejší a levnější přístup k reálným prototypům, se kterými lze následně dále pracovat, čímž se docílí urychlení vývoje finálního produktu a zároveň je vývojářům poskytnut větší prostor pro detekci a vyladění případných chyb. Tento obor do sebe zahrnuje několik procesů, během kterých dochází k přípravě virtuálních dat (*pre-processing*), výrobě reálného modelu (*processing*), jeho následnému opracování a finálním úpravám (*post-processing*). Samotné prototypy většinou nejsou určeny pro plné nasazení a slouží pouze jako reference k odladění chyb a přípravu finálního produktu na sériovou výrobu [3].

2.1 Pre-processing

Pre-processing je prvním krokem při výrobě prototypů a lze ho rozdělit do dvou fází. V první fázi dochází k návrhu samotného designu prototypu a jeho vymodelováním v některém ze software typu CAD (*Computer Aided Design*). Tyto programy umožňují konstrukci modelu libovolného tvaru a možnost jeho úprav v reálném čase a z vytvořených objektů lze také skládat větší celky, různě je do sebe ukotvit a následně vyzkoušet jejich chování v této soustavě. Bez nutné přítomnosti reálného prototypu lze tedy ověřit, zda do sebe komponenty správně zapadají a zdali nedochází při jejich pohybu ke kolizi s jinými částmi soustavy. Lépe vybavený software také umožňuje simulovat na modelu působení sil nebo termodynamické vlastnosti. Další funkcí některých softwarových balíků je takzvaný CAM (*Computer Aided Manufacturing*), tj. vizualizace průběhu výroby. Zde lze nasimulovat výrobní proces, přičemž jsou podporovány jak aditivní, tak subtraktivní metody. Podle zadaných parametrů lze sledovat pohyb virtuální tiskové hlavy, laseru nebo obráběcí frézy, čehož se využívá při detekci a řešení některých problémů vzniklých při reálné výrobě. Ve většině případů se při nálezů jakékoliv chyby na prototypu provádějí úpravy virtuálního modelu. Z CAD software jsou data vyexportována nejčastěji ve formátu STL, který je dnes podporován každým slicer softwarem, od komerčních pro profesionály, až po open source řešení pro domácí hobby využití [4].

Druhou fází pre-processingu je tzv. *slicing*, tj. příprava objektu na samotný tisk a nastavení výrobních parametrů. Toho je docíleno rozdělením modelu na vrstvy dle nastavené výšky. Vzniká tedy velké množství 2D objektů naskládaných na sebe, což umožňuje pro každou vrstvu vypočítat trajektorii pohybu např. tiskové hlavy 3D tiskárny v dané výšce. Za tímto účelem je použit druh software zvaný slicer, který tyto přípravy umožňuje. Kromě úpravy samotného modelu lze ve sliceru nastavit i důležité výrobní parametry, jako např. rychlost tisku, typ a hustotu výplně, podpůrné struktury a mnoho dalších proměnných majících vliv nejen na kvalitu a rychlost tisku, ale i na mechanické vlastnosti výtisku. Ze zdarma dostupných lze zmínit například open source projekt Slic3r, vyvíjený komunitou nadšenců 3D tisku [5], nebo Cura, vyvinutý firmou Ultimaker pro jejich komerční tiskárny [6]. Díky tomu se za několik let dostal na úroveň, kdy je schopen konkurovat i některým profesionálním slicerům za stovky dolarů. V této kategorii vyniká například software Simplify3D. Jedná se sice již o placený software, umožňuje však větší rychlost přípravy modelu, možnost manuálně umístit podpůrné struktury a také kvalitní technickou podporu bez nutnosti dlouze hledat na komunitních fórech. Mnoho uživatelů také zmiňuje kvalitnější výtisky po použití tohoto software [7].

2.2 Processing

Základní funkcí slicer software, ať už komerčních nebo zdarma dostupných, je transformace 3D modelu, nejčastěji ve formátu STL, do tzv. G kódu nebo jeho modifikací (např. S-code pro SLS 3D tiskárnu Lisa 2). Pomocí tohoto kódu se předávají tiskárně základní údaje o průběhu tisku jako souřadnice, po kterých se má pohybovat tisková hlava, nastavení teplot, chlazení a dalších parametrů důležitých pro samotný proces tisku. G kód a jeho modifikace jsou dále zpracovány firmwarem tiskárny a následně jsou provedeny úkony podle zadaných instrukcí. Tímto začíná fáze processing, obsahující samotný tisk. Pro výrobu prototypů existuje několik technologických postupů, jejichž volba závisí na požadavcích vývojářů. Tiskárna následně vyrobí prototyp vrstvu po vrstvě, pracujíc plně autonomně, bez nutnosti zásahu do procesu.

2.3 Post-processing

Po ukončení tisku je nutné výrobek vyjmout z tiskárny a dle použité technologie patřičně opracovat, abychom docílili požadovaného vzhledu. Post-processing zahrnuje odejmutí podpůrných struktur, leštění a broušení výtisku, vyhlazení povrchu pomocí

chemikálií, v případě použití práškových technologií je nutné nejdříve tiskový prostor odsát od nepoužitého prášku a výtisk následně očistit vysokým tlakem a pískovat. Některé technologie vyžadují pro dosažení výsledné kvality dodatečné chlazení nebo vytvrzování výtisku UV světlem. Po ukončení samotného procesu tisku lze prototypy dále různě lakovat nebo impregnovat, čímž lze zlepšit jejich životnost a estetiku [1].

2.4 Princip odejmutí podpůrných konstrukcí

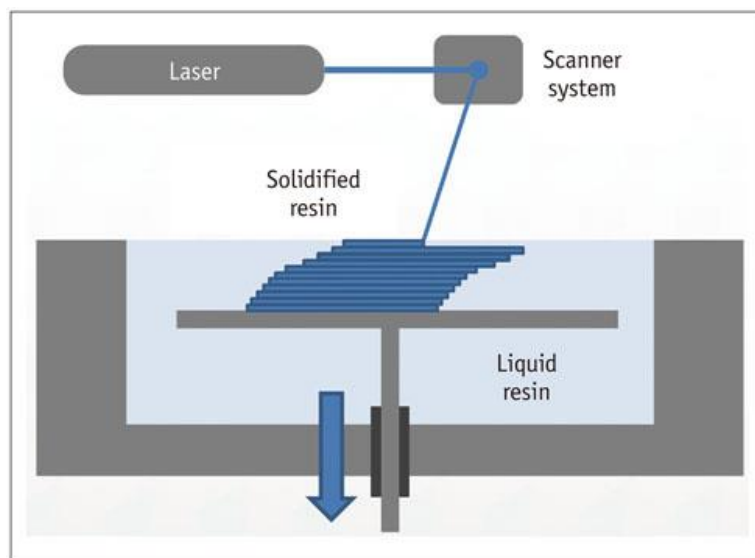
Při výrobě geometricky složitých objektů je nutné použití podpůrných konstrukcí. Nejvíce problémové bývají oblasti s převisem pod úhlem více jak 45°C. Pod tato místa se ve sliceru dopočítá konstrukce s předem nastavenou tloušťkou stěny a hustotou, aby zde nebyl materiál podáván do vzduchu. Použití práškových technologií pro výrobu nutnost podpůrných konstrukcí eliminuje, jelikož jako podpora slouží okolní prášek. Po ukončení tisku je nutné podpory odstranit několika možnými způsoby dle použitého materiálu. Nejčastějším případem je *Breakaway support technology*, při níž je podpora ručně ulomena. Jedná se o efektivní a rychlou metodu, v některých případech však mohou na výtisku stopy po těchto konstrukcích zůstat. Materiál lze také odstranit proudem vody pod vysokým tlakem neboli technologií *WaterJet*. Tato metoda by neměla na výtisku zanechat žádné pozůstatky po použitých podporách. V dnešní době však existuje řada materiálů rozpustných ve vodě nebo jiných kapalinách, jež lze použít pro 3D tisk nejen na drahých průmyslových 3D tiskárnách. Tyto materiály jsou využívány pro realizaci podpůrných struktur metodou dvou materiálového tisku, kdy je v každé vrstvě střídavě tisknuta samotná konstrukce výrobku a podpora. Výtisk je pak umístěn do kapaliny vhodné pro rozpuštění konkrétního podpůrného materiálu a po několika minutách zůstane pouze požadovaná konstrukce. Tato metoda se nazývá *Soluble Support Technology* a je doporučena pro dosažení nejlepších detailů tisku [8].

3 Nejpoužívanější rapid prototyping technologie

Proces 3D tisku může probíhat několika různými způsoby. Pro každou technologii jsou dostupné jiné materiály a lze pomocí nich dosáhnout různé kvality a odolnosti výtisku. V následující kapitole jsou zahrnuty technologie, které jsou v dnešním průmyslu a vývoji prototypů vidět nejčastěji.

3.1 SLA

Historicky nejstarší metodou 3D tisku je tzv. SLA neboli Stereolitografie, patentována Charlesem W. Hullem v 80. letech [9]. Tato technologie využívá vlastností akrylátových a epoxidových pryskyřic, jež lze vytvrzovat působením UV záření. Tiskárny tohoto typu obsahují nádobu na tekutý fotopolymer zvaný resin, v ose Z pohyblivou pracovní desku, na kterou je výtisk uchycen a optickou soustavu určenou k vytvrzování resinu vrstvu po vrstvě (obr. 1). V původní SLA tiskárně probíhalo vytvrzení laserem shora, výtisk se tedy postupně ponořoval do nádoby na fotopolymer. V dnes dostupných komerčních tiskárnách probíhá proces obráceně, tisk začíná u dna nádoby a po vytvrzení každé vrstvy je pracovní podložka posunuta nahoru. Vzniká tím tedy estetický efekt vytahování hotového výrobku z nádoby naplněné fotopolymerem [10].

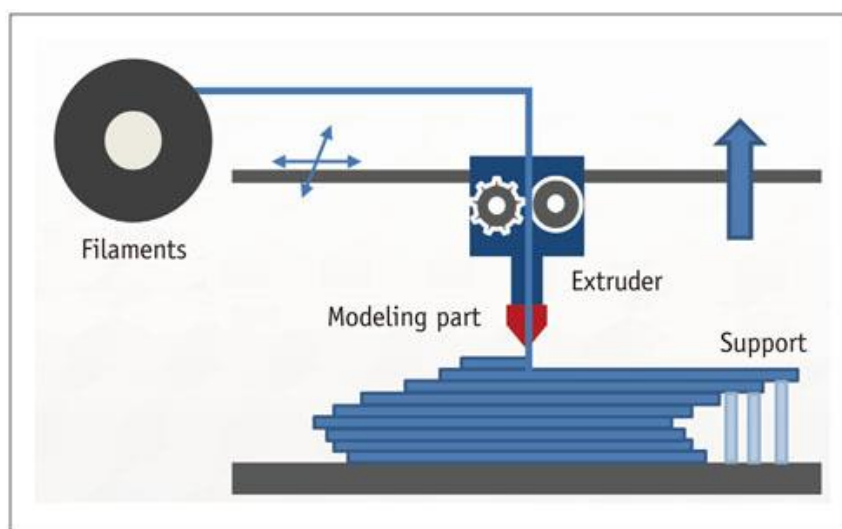


Obrázek 1 – Princip technologie SLA [11]

3.2 FFF

Fused filament deposition neboli FFF, dnes patří mezi nejrozšířenější metody 3D tisku převážně díky vysokému zájmu hobby komunity. Tato technologie byla vyvinuta firmou Stratasys (registrováno jako FDM – Fused deposition modeling) a je založena na principu protlačování vstupního materiálu ve formě struny skrze trysku nahřátou na teplotu tání použitého materiálu (obr.2). Zařízení zajišťující pohyb struny se nazývá extruder. Roztavený materiál vytéká z trysky, která svým pohybem vykresluje jednotlivé vrstvy výtisku. Materiál se po vytlačení uchytí na tiskovou podložku nebo předchozí vrstvu a je ihned ochlazován ventilátorem. Po dokončení vrstvy se tryska posune výše v ose Z o předem nastavenou hodnotu a začne vykreslovat vrstvu další [12].

Výhodou této technologie je jednoduchost procesu, dostupnost a cena relativně kvalitních tiskáren, a čistota provozu. Nevýhody této technologie se začínou projevovat při tisku komplikovaných struktur, topologicky optimalizovaných konstrukcí nebo např. designových předmětů. Mnoho těchto nedokonalostí lze vyřešit správným vyladěním slicer software, konstrukční úpravou 3D tiskárny nebo použitím specializovaných materiálů. Problém s podpěrami lze například eliminovat použitím dvou trysek, kde jedna nanáší požadovaný materiál a druhá materiál podpůrný, rozpustný ve vodě. Použitím extruderů s více tiskovými hlavami lze také tisknout vícebarevně.

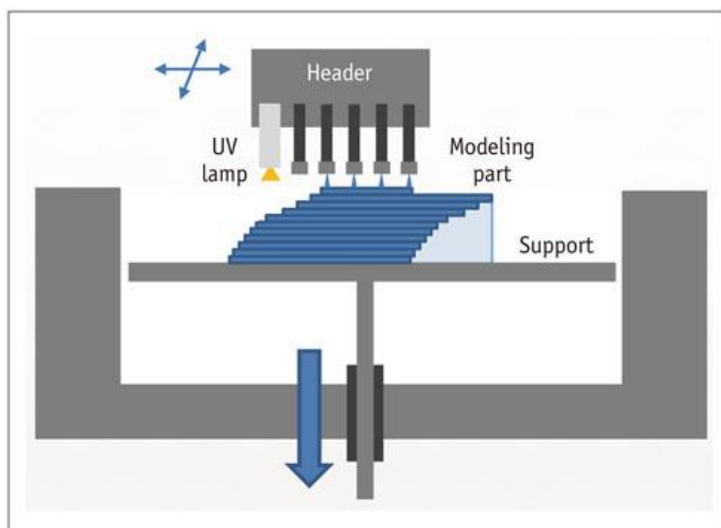


Obrázek 2 – Princip technologie FFF [11]

3.3 PolyJet

Technologie PolyJet byla patentována izraelskou firmou Objet Geometrie v roce 1998, jedná se tedy o jednu z nejmladších metod. Funguje na principu nanášení tenkých vrstev fotopolymeru pomocí tiskových hlav obsahujících matici miniaturních trysek (obr.3) jako u klasických 2D tiskáren. Fotopolymer je následně vytvrzován intenzivním UV světlem, ihned po nanesení [1]. Výhodou této metody je možnost použití mnoha typů materiálů s různými vlastnostmi a možnost tisku s minimální výškou vrstvy, díky čemuž lze dosáhnout výrazně hladšího povrchu výtisku. Další z výhod tiskáren na principu PolyJet je možnost nanášet zároveň několik různých materiálů nebo různých barev [10].

Nevýhodou je podobně jako u technologie FFF nutnost použití podpůrných struktur, tento problém je však elegantně vyřešen vícemateriálovým tiskem s použitím podpůrného materiálu rozpustného ve vodě. Ten je po ukončení tisku nutno odstranit vysokotlakým vodním proudem. Metoda PolyJet navzdory nutnosti post-processingu tištěných dílů umožňuje výrobu přesných prototypů, medicínských pomůcek nebo dekorativních předmětů. Díky možnosti nanášet více materiálů najednou v rámci jedné vrstvy lze vytisknout průhledný materiál s barevnými detaily uvnitř, což lze využít např. pro výrobu výukových pomůcek apod.

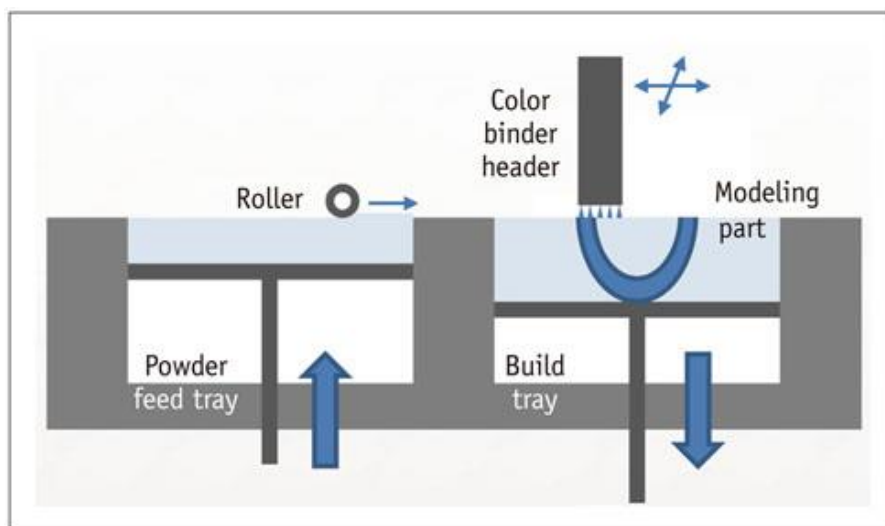


Obrázek 3 – Princip technologie PolyJet [11]

3.4 Multi Jet Fusion

S technologií Multi Jet Fusion přišla společnost HP v roce 2016. Tato velice inovativní technologie těží z mnohaleté zkušenosti HP v oblasti inkoustového tisku a funguje na principu selektivního vstřikování kapaliny zvané agent do polyamidového prášku po vrstvách nanášeného do tiskového prostoru. Do tiskové hlavy, pohybující se nad tiskovým prostorem (obr.4), jsou zavedeny dva druhy agentu. První, zvaný fusing agent, je určen k vytvoření 2D obrazu výtisku v každé vrstvě. Zároveň je aplikována druhá složka, zvaná detailing agent, sloužící k ochraně povrchu výtisku. Tiskový prostor je vyhříván na teplotu těsně pod bodem tání tištěného materiálu. Po nanesení prášku a vstříknutí agentu přejede nad tiskovým prostorem zdroj intenzivního světla. Jelikož má agent černou barvu, dojde v místech jeho aplikace po vystavení světelnému zdroji k vyššímu nárustu teploty než v okolním prášku [13].

Výhodou této technologie je vynikající kvalita a rozměrová přesnost výtisků a také rychlost tisku. Tisk každé vrstvy trvá stejnou dobu, nezávisle na množství modelů umístěných do tiskového prostoru. Momentálně se jedná o technologii nabízející nejlepší výsledky, vhodnou k použití v průmyslu pro výrobu malých sérií. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a náročnost na údržbu tiskárny.

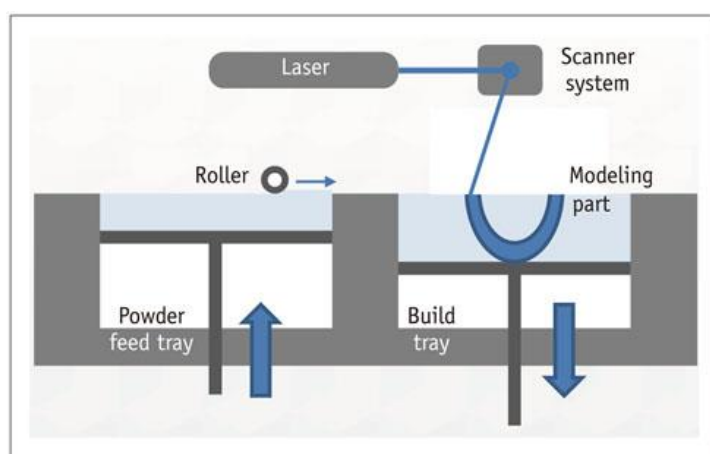


Obrázek 4 – Princip technologie Jet Fusion [11]

3.5 SLS

Dalším zástupcem práškových technologií je Selective Laser Sintering. Při tisku pomocí této technologie jsou do tiskového prostoru postupně nanášeny vrstvy prášku, který je následně selektivně spékán laserovou hlavou. Tisková komora bývá většinou vyhřívána na teplotu těsně pod bod tání tištěného materiálu, čímž se snižují nároky na výkon laseru. V praxi se lze setkat se dvěma způsoby provedení těchto tiskáren. Laser může být buď stabilně ukotven nad tiskovou komorou a paprsek je pomocí zrcadel usměrňován po pracovní ploše (obr. 5), nebo je možné použít laserový plotter kreslící do prášku jednotlivé vrstvy. V tiskárně se dále nachází dvě totožné komory, z nichž jedna slouží jako zásobník materiálu pro tisk a druhá jako samotná pracovní plocha. Materiál je během tisku přenášén z jedné komory do druhé pomocí mechanismu, jenž se nazývá recoater. Přebytný prášek je po nanesení každé vrstvy smeten do přepadové nádoby [2].

Velikou výhodou této technologie je možnost tisku komplikovaných struktur a topologicky optimalizovaných dílů. SLS také umožňuje zaplnění celého tiskového objemu, tzn. výtisky mohou být naskládány nad sebou, jelikož okolní nespečený prášek slouží jako podpora. Jako nevýhodu je nutno zmínit potřebu složitého post-processing dílů, které je potřeba očistit od okolního prášku a pískovat [1]. Většina materiálů pro tuto technologii je složena z velice jemných částic, a tudíž je velice obtížné udržovat čistotu v okolí tiskárny z důvodu extrémní prašnosti.



Obrázek 5 – Princip technologie SLS [11]

4 Realizace polohovacího algoritmu

Pro využití 3D tisku pomocí technologie SLS v laboratoři CXI vznikla potřeba vývoje software, který umožní automaticky vyřešit jeden z největších problémů při využití této technologie, komplikovaný tisk velkých ploch. Algoritmus je navržen tak, aby analyzoval rozvoj plochy modelu po jednotlivých vrstvách, a našel jeho optimální natočení pro dosažení co nejvyšší rozměrové přesnosti výtisku. Styčná plocha mezi výtiskem a okolním nespečeným práškem by zároveň měla dosahovat maximální možné hodnoty.

4.1 Problematika polohování dílu pro tisk pomocí SLS

Práškové technologie nabízí velkou výhodu v možnosti umístění výtisku libovolně kamkoliv do tiskového prostoru. Nespečený prášek slouží jako podpůrný materiál, díky čemuž lze při tisku menších sérií prototypů duplikovat model v tiskovém prostoru nejen dle osy X a Y, ale i v ose Z. S technologií FFF by bylo nutné vytvořit speciální podpůrné struktury, což by mohlo vést k horší kvalitě povrchu výtisků, na něž by byl podpůrný materiál nanášen.

Při tisku pomocí technologie SLS však vzniká několik problémů, jenž jsou pro tuto technologii specifické a FFF tiskárny jimi netrpí. Největším z problémů je komplikovaný tisk velkých ploch, které po spečení nabydou na hmotnosti a propadají se do nespečeného prášku pod nimi [14]. Výsledkem je tedy oblý tvar místo rovné plochy. Řešením tohoto problému je polohování výtisku tak, aby docházelo k rozvoji spěkané plochy jednotlivých vrstev postupně od téměř nulové hodnoty až k maximu. Také tisk masivních modelů s velkou plochou jednotlivých vrstev může být problematický, model je však možné vytisknout jako dutý objekt, přičemž nespečený prášek uvnitř slouží jako výplň. Touto metodou lze docílit také výrazného zrychlení tisku [15].

Dalším problémem je distribuce tepelné energie v tiskovém prostoru, kdy se při umístění několika modelů nad sebe nebo špatném polohování jednoho složitějšího dílu teplo akumuluje na určitých místech, jenž může při chladnutí tiskového prostoru po tisku způsobit zkroucení výtisku nebo jeho části. Tato problematika je řešena již při přípravě dat a díly je nutno polohovat takovým způsobem, aby mohlo teplo ze všech výtisků stoupat rovnoměrně směrem vzhůru a neakumulovat se. Výtisky kupolovitého tvaru nebo

obsahující neprůchozí otvory jsou pro tisk obzvlášť problematické a pro dosažení maximální možné kvality je potřeba je polohovat tak, aby nedošlo k akumulaci tepelné energie v žádné jejich části [16].

4.2 Použité zařízení – Sinterit Lisa Pro

Pro testování polohovacích algoritmů sloužila tiskárna Lisa Pro od společnosti Sinterit (obr.6). Jedná se již o druhou verzi této tiskárny, jež prošla několika úpravami a proti své první verzi může nabídnout kvalitnější kinematiku a větší tiskový prostor, jenž je velký 150×200×260 mm, bezzávadný tisk je však zaručen v prostoru o velikosti 90×130×230 mm. Tiskový prostor je tedy poměrně malý, což je jednou z nevýhod tiskáren tohoto typu. Vypalovací LED laser o výkonu 5 W s vlnovou délkou 808 nm je zde umístěn na plotteru a při tisku je tedy v pohybu. Výrobce však přesto udává přesnost až 0,05 mm. Tiskový prostor je vyhříván výbojkami a průměrná spotřeba tiskárny dosahuje kolem 1 kW. Jelikož je tiskový prostor při procesu tisku hermeticky uzavřen, umožňuje tiskárna jeho naplnění dusíkem pro lepší inertnost atmosféry a možnost tisku při vyšších teplotách.

K tiskárně je dodáván software Sinterit studio, jenž slouží k přípravě dat k tisku. Umožňuje zvolit jeden z několika dostupných materiálů, výšku vrstvy v rozmezí 0,075 až 0,15 mm a také v něm lze upravit některé z vlastností modelů, rotovat je v jednotlivých osách nebo změnit jejich velikost. Výsledná orientace dílů je převedena na S-code pro řídicí jednotku tiskárny. Tento software byl použit pro přípravu testovacích výtisků dle výstupu z optimalizačního algoritmu [17].



Obrázek 6 – Čelní pohled na tiskárnu Lisa Pro [17]

4.3 Materiály dostupné pro Lisa Pro

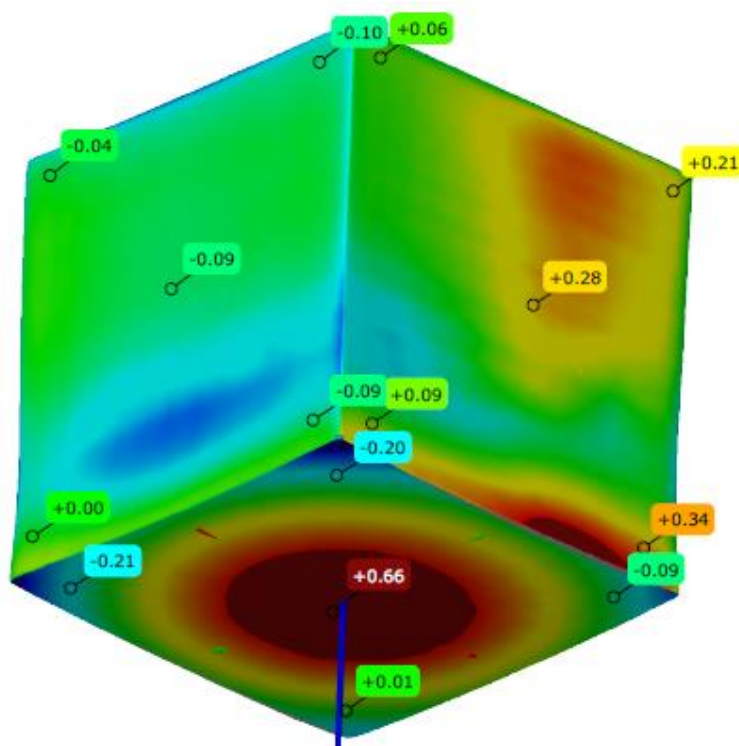
Nejčastěji používaným materiálem je Polyamid PA12, který disponuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Tento materiál se zde využívá ve formě prášku s granulací maximálně 90 um. Pevnost v tahu u PA12 dosahuje hodnoty 45 MPa a je tudíž vhodný k tisku funkčních, dlouhodobě zatěžovaných dílů. Materiál taje při teplotě 182 °C, v tiskové komoře je ohříván na 180 °C, teplotu potřebnou ke spečení dosáhne vlivem působení laseru. Dokud není materiál kontaminován, je neomezeně recyklovatelný, musí však být smíchán s čerstvým v poměru 1:3.

Přestože byl během vypracování použit pouze materiál PA12, nabízí firma Sinterit i několik dalších, ze kterých lze na Lise tisknout. Například materiál Polyamid PA11, obchodně zvaný Onyx, nabízí větší pevnost v tahu, vyšší odolnost vůči UV záření a vlhkosti, a je tedy vhodný pro tisk výrobků použitých v náročných klimatických podmínkách.

Nejnovějším materiálem pro použití v Lise je termoplastický elastomer (TPE), který nabízí možnost tisku flexibilních dílů. Navíc je odolný vůči olejům a vodě. Z tohoto materiálu lze tisknout různá těsnění nebo tlumící přípravky. Dalším podobným dostupným materiálem je TPU, obchodně zvaný Flexa, jenž nabízí mnohem lepší pružnost a flexibilitu. Prášek je k dispozici v několika barvách, které jsou vyzkoušeny a otestovány firmou Sinterit [17].

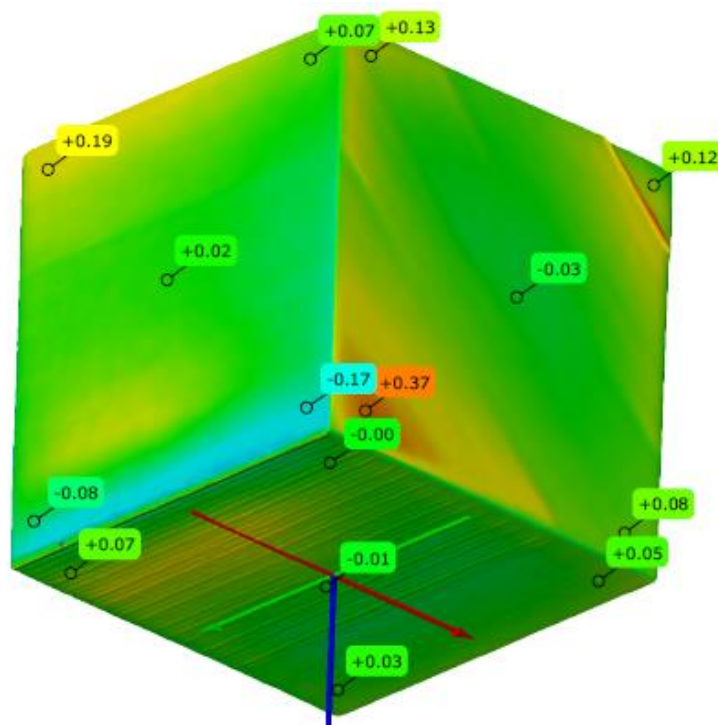
4.4 Analýza testovacích výtisků

Typickým příkladem pro testování různých metod polohování je tisk jednoduchých geometrických těles, v případě této práce krychle. Použita byla krychle o délce stran 40 mm a za účelem praktického ověření byla vytištěna třemi různými způsoby. V prvním případě bez jakéhokoliv polohování, což se výrazně projevilo na kvalitě výtisku. Při spečení velké plochy došlo k propadu vrstev do prášku pod výtiskem a výsledkem byla nepřesná, pokřivená krychle s propadlou spodní stranou (obr. 7).



Obrázek 7 – Výtisk bez polohování (výrazná deformace na spodní straně)

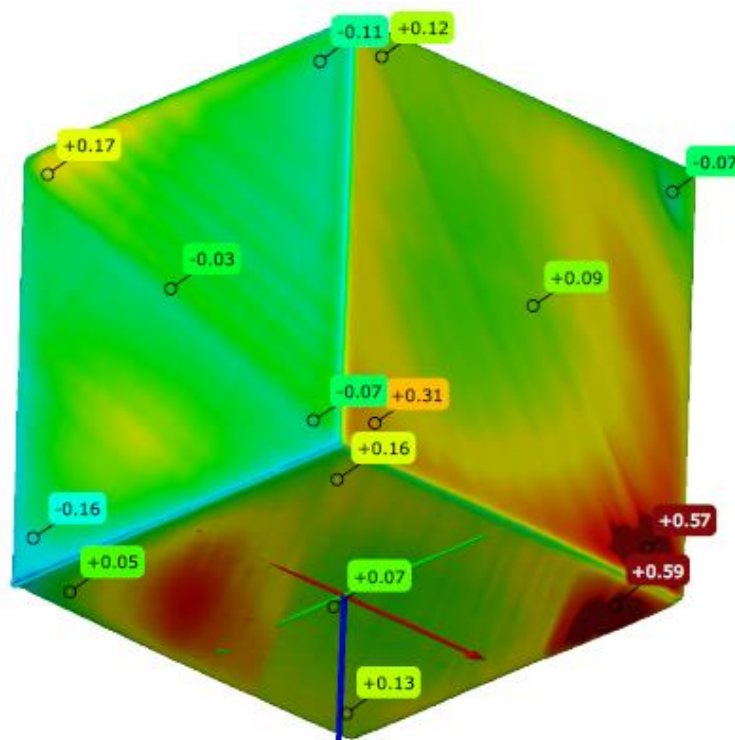
V druhém případě, kdy byla krychle pootočena dle jedné osy o 45 °C a v tiskovém prostoru tedy stála na hraně, došlo k výraznému zlepšení kvality výtisku z důvodu zvýšení plochy mezi výtiskem a okolním nespečeným práškem sloužícím jako podpůrný materiál. Výtisk polohovaný touto metodou dosahoval nejlepší rozměrové přesnosti (obr. 8).



Obrázek 8 – Druhá metoda polohování

Podobného výsledku bylo dosaženo i při rotaci výtisku o 45 °C v obou osách, kdy krychle stála na jednom z vrcholů a rozvoj plochy do výšky probíhal od relativně nulové hodnoty. Velikost plochy podpůrného materiálu zde dosahovala nejvyšší možné hodnoty. Na výtisku se však projeví nerovnosti způsobené pravděpodobně recoaterem tiskárny (obr. 9) a při analýze tedy nedosáhl stejné kvality jako výtisk polohovaný druhou metodou. Výtisky byly v laboratoři 3D měření a digitalizace naskenovány na 3D skeneru Atos Triplescan a po porovnání naskenovaných dat s CAD modelem bylo zjištěno, že při použití druhé a třetí metody lze dosáhnout velice podobné kvality výtisku.

Podrobnější analýza v software Matlab následně ukázala, že rozvoj plochy výtisku po jednotlivých vrstvách při tomto způsobu polohování nabývá podobnosti s Gaussovou křivkou. Toto zjištění je klíčovou informací při tvorbě optimalizačního algoritmu a později bylo zjištěno, že jej lze využít i při polohování složitých konstrukčních dílů.



Obrázek 9 – Třetí metoda polohování (občasné nedokonalosti povrchu způsobené chybou tiskárny)

4.5 Formát STL

Vstupními daty pro optimalizační algoritmus byly soubory ve formátu STL. Tento formát je v dnešní době standardem využívaným ve všech sférách aditivní výroby. Vytvořen byl společností 3D Systems a popisuje geometrii trojrozměrného objektu bez informace o jeho barvách či texturách, jak je tomu u jiných formátů využívaných v CAD software [1]. Při exportu CAD modelu do tohoto formátu je objekt triangulován, tzn. popsán pomocí trojúhelníků a jejich jednotkových normálových vektorů v kartézské souřadnicové soustavě [4]. Při exportu lze zároveň určit hustotu triangulace, díky čemuž může být dosažena lepší kvalita dat pro 3D tiskárnu, s narůstajícím počtem trojúhelníků však roste také velikost souboru výpočetní náročnost při jeho dalším zpracování. Nižší hustota trojúhelníků se výrazně projeví na kvalitě modelu a může dokonce dojít k jeho znehodnocení.

Struktura STL souboru může být vytvořena dvěma různými způsoby. Dříve byl využíván textový ASCII formát, který sice nabízí lepší přehlednost a možnost drobných úprav dat bez použití CAD software, při jeho použití u velkých komplikovaných modelů však výrazně narůstá jeho velikost. Textový STL soubor začíná vždy řádkem:

```
solid jméno
```

kde *jméno* je nepovinný parametr značící název modelu. Pokud není modelu žádné jméno přiřazeno, musí za slovem *solid* následovat mezera. Následně je definován libovolný počet trojúhelníků, z nichž každý je popsán nejprve normálovým jednotkovým vektorem, ukazujícím směrem ven z objektu, a třemi body v kartézském souřadném systému.

```
facet normal ni nj nk
  outer loop
    vertex v1x v1y v1z
    vertex v2x v2y v2z
    vertex v3x v3y v3z
  endloop
endfacet
```

Soubor je zakončen řádkem:

```
endsolid jméno
```

Vzhledem k narůstajícímu využití CAD software v průmyslu vznikla potřeba nového způsobu zápisu STL souborů, jelikož textový formát může být při aplikaci na složité modely velice rozsáhlý a náročný na úložný prostor [1]. Řešením je binární zápis, který začíná 80 bytovou hlavičkou, za kterou následuje čtyřbytové číslo udávající počet trojúhelníků v souboru. Následuje popis jednotlivých trojúhelníků a soubor je ukončen popisem posledního. Každý z trojúhelníků je opsán dvanácti čísly ve formátu int32, kde první tři určují normálu stěny a další souřadnice jednotlivých vrcholů. Čísla jsou ukládána v pořadí little endian a výsledná struktura souboru vypadá následovně:

```
UINT8[80] - Hlavička
UINT32 - Počet trojúhelníků

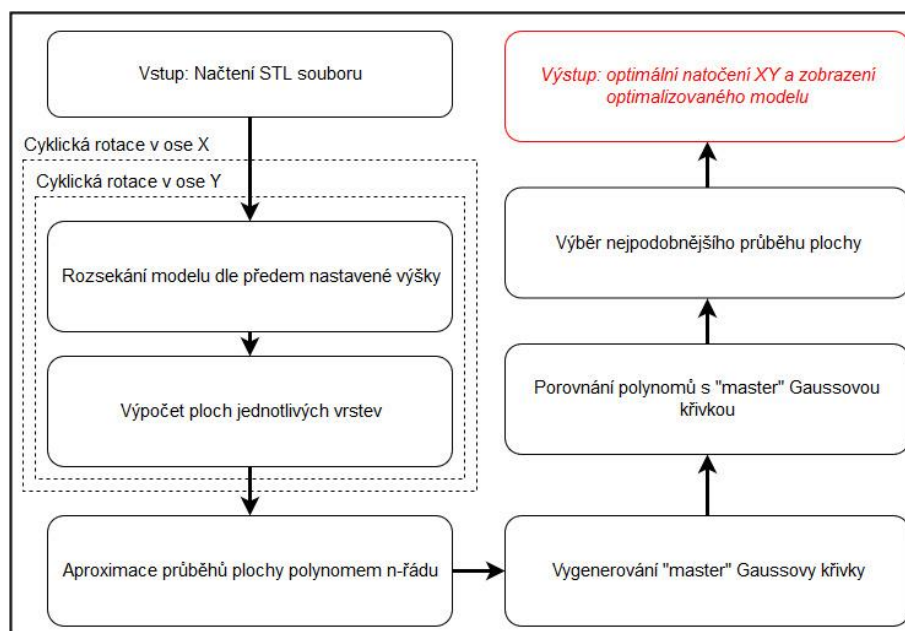
pro každý trojúhelník
REAL32[3] - Normálový vektor
REAL32[3] - Vrchol 1
REAL32[3] - Vrchol 2
REAL32[3] - Vrchol 3
UINT16 - 0 (Nulový parametr značící konec popisu trojúhelníku)

Konec
```

4.6 Implementace polohovacího algoritmu

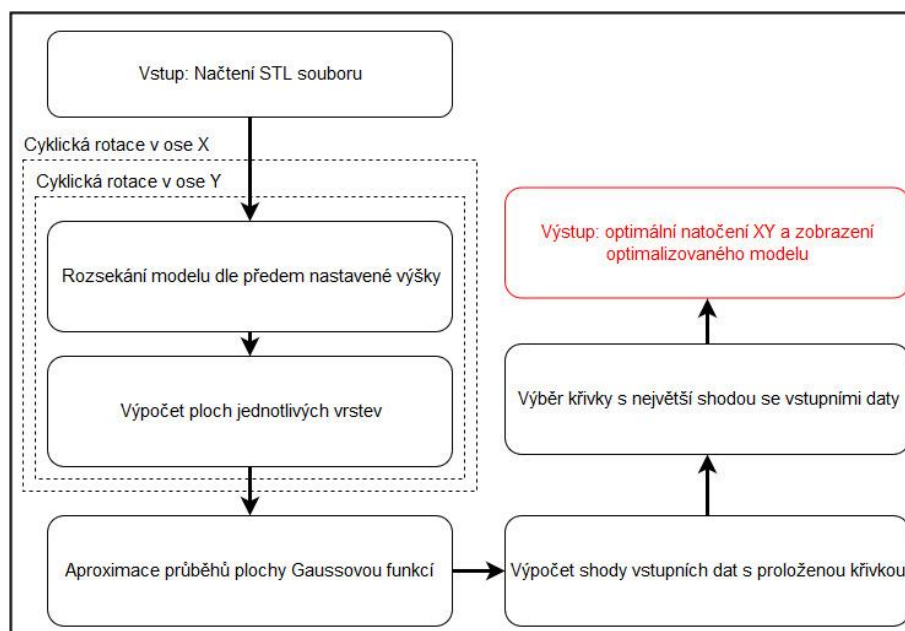
Díky informacím získaných analýzou testovacích výtisků jednoduchého geometrického útvaru byl vytvořen optimalizační algoritmus vycházející z podobnosti nejvhodnějšího rozvoje plochy při tisku s Gaussovou křivkou. Vstupními daty je soubor ve formátu STL (binární nebo ASCII) a model je rotován dle osy X a Y o předem zadaný úhel α v rozsahu 0 až $(360^\circ - \alpha)$, kvůli shodě polohy modelu při $\alpha = 0^\circ$ a 360° . Velikost tohoto úhlu je volitelná a udává přesnost optimalizace modelu, zároveň však při použití příliš malých hodnot roste výpočetní náročnost algoritmu. Velikost úhlu α je vhodné volit tak, aby jí bylo možné beze zbytku dělit maximální hodnotu rotace, tedy 360° .

Při každé kombinaci rotace XY je model následně rozsekán na jednotlivé vrstvy dle předem nastavené výšky, která je také volitelná. Výstupem je matice bodů tvořících kontury jednotlivých vrstev. Tento postup je typický pro všechny software typu slicer. Po slicingu je cyklicky spočítána plocha každé vrstvy a hodnoty jsou uloženy do matice. Pro každou kombinaci rotace XY tedy vznikne průběh plochy v závislosti na stavební výšce, ke kterému lze přistupovat jako k matematické funkci. Původní myšlenkou bylo tento průběh aproximovat polynomem n-řádu, kde volba n zpřesňovala aproximaci, ale také rostla náročnost na výpočetní výkon. Tyto polynomy byly následně porovnány s vygenerovanou referenční Gaussovou křivkou a nejpodobnější průběh byl volen jako nejoptimálnější (obr.10).



Obrázek 10 – Blokové schéma první verze algoritmu

Po implementaci této verze algoritmu se ukázalo, že se jedná o neefektivní přístup. Ačkoliv byl vždy nalezen nejpodobnější polynom, nejednalo se o neoptimálnější rotaci, jelikož průběhy, jež by dosáhly větší podobnosti s referenční křivkou, od ní byly posunuty po ose X a porovnávaná data se tedy překrývala pouze ve zlomku průběhu. Řešením tohoto problému by mohla být implementace kompenzace tohoto offsetu, přesto se však jako lepší přístup ukázala úprava parametrů aproximace. Každý z průběhů byl tedy proložen jedinečnou Gaussovou křivkou, přičemž jako neoptimálnější byla volena ta, která se nejvíce shodovala s aproximovanými daty (obr. 11). Použitím této modifikace odpadla nutnost generovat referenční Gaussovu křivku a data po aproximaci dále porovnávat. Celkový čas výpočtu se díky této úpravě výrazně zrychlil.



Obrázek 11 – Blokové schéma druhé verze algoritmu

4.7 Načtení STL souboru a slicing dle nastavené výšky

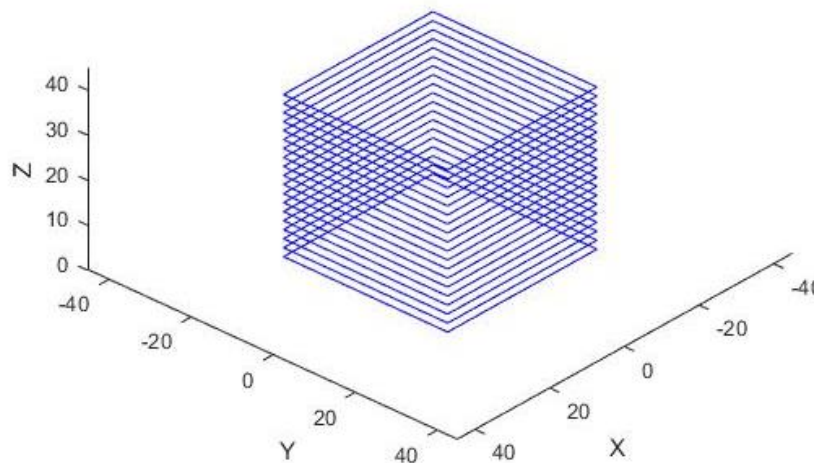
Pro realizaci polohovacího algoritmu byl použit software Matlab, který umožňuje jednoduchou práci s maticemi a díky tomu se ukázal jako nejvhodnější vývojové prostředí. Díky komunitě na portálu MathWorks File Exchange již navíc existují hotové funkce přímo pro práci s STL soubory, které tedy nebylo nutné implementovat. Pro načtení STL souboru do Matlabu byl použit open source skript od autora Sunil Bhandari, zdarma dostupný na File Exchange. Stažený balík obsahoval několik funkcí, z nichž jedna umožňuje načtení souboru v binárním formátu STL a vygenerování matice obsahující vrcholy všech trojúhelníků popisujících daný model. Funkce se nazývá *read_binary_stl_file* a po zavolání přečte STL soubor zadaný jako argument, detekuje v něm počet trojúhelníků a uloží souřadnice jejich vrcholů do výstupní matice [18].

```

%Vstupem do funkce je binární STL soubor a výstupem je matice souřadnic
%vrcholů jednotlivých trojúhelníků
function triangles = read_binary_stl_file(filename);
%Otevření STL souboru
f = fopen(filename,'r');
%Načtení obsahu souboru do pomocné proměnné
rd = fread(f,inf,'uint8=>uint8');
%Detekce počtů trojúhelníků
numTriangles = typecast(rd(81:84),'uint32');
%Alokace matice pro jednotlivé trojúhelníky
triangles = zeros(numTriangles,12);
sh = reshape(rd(85:end),50,numTriangles);
tt =
reshape(typecast(reshape(sh(1:48,1:numTriangles),1,48*numTriangles),'single')
,12,numTriangles)';
%Zápis vrcholů do výstupní matice
triangles(:,1:9) = tt(:,4:12);
triangles(:,10:12) = tt(:,1:3);
%Zavření souboru
close all;
end

```

Výsledkem této funkce je matice *triangles* obsahující souřadnice vrcholů trojúhelníku triangulovaného objektu v kartézské soustavě souřadnic. Pro získání jednotlivých vrstev je následně použita funkce *slice_stl*, jejímiž vstupními parametry jsou matice vrcholů trojúhelníků *triangles* a předem deklarovaná výška vrstvy *slice_height*. Funkce následně nalezne průsečíky plochy jednotlivých trojúhelníků s plochu aktuální vrstvy a vytvoří konturu modelu v dané výšce (obr.12). Tyto kontury jsou společně s hodnotami výšky jednotlivých vrstev výstupem funkce [18].

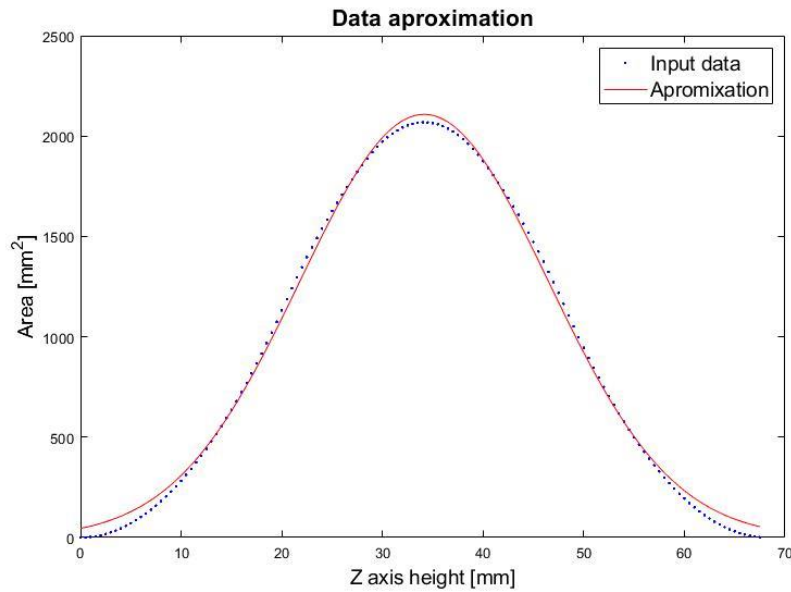


Obrázek 12 – Vrstvy modelu krychle po slicing (slice_height = 1)

Použitím stažených, již hotových, funkcí byl zajištěn import vstupních dat pro další zpracování a následně na ně bylo navázáno implementací vlastního algoritmu. Během slicing modelu se pro každou vrstvu spočítá její plocha pomocí funkce *polyarea*, jež je obsažena v základní verzi Matlabu. Pro každou kombinaci rotace XY vznikne průběh plochy v závislosti na výšce Z, který lze dále analyzovat jako matematickou funkci. Struktura této části skriptu vypadá následovně:

```
for x = 0: alpha : (360-alpha) %Cyklicka rotace dle X
    triangles = rotate_stl(triangles,'x',x);
    for y = 0 : alpha : (360-alpha) %Cyklicka rotace dle Y
        triangles = rotate_stl(triangles,'y',y);
        [movelist_all,z_slices] = slice_stl(triangles,slice_height); %Slicing
        if (info_out) %Vypis informaci o prubehu vypoctu do konzole IDE
            str = sprintf('Slicing %i/%i - X: %i °/ Y: %i °',n,rot_n,x,y);
            disp(str);
        end
        %Cyklicky vypocet plochy pro kazdou vrstvu
        for i = 1 : size(movelist_all,2)
            mlst_all = movelist_all{i};
            if ~isempty(mlst_all)
                mlst_all(isnan(mlst_all)) = 0;
                area(n,i) = polyarea(mlst_all(:,1),mlst_all(:,2));
            end
        end
        %Aktualizace dat potrebnych pro dalsi beh programu
        x_rot(n)= x;
        y_rot(n)= y;
        n = n + 1;
    end
end
```

Po ukončení těchto dvou do sebe vnořených cyklů je pro další analýzu k dispozici matice rozvoje plochy modelu ve výšce Z pro každou z kombinací rotace osy X a Y. K těmto datům je v následující části algoritmu přistupováno dle informací zjištěných analýzou testovacích výtisků.



Obrázek 13 – Aproximace průběhu plochy modelu při tisku

V této fázi optimalizace je vycházeno ze zásadního zjištění podobnosti průběhu plochy krychle, při tisku natočené na vrchol, a Gaussovy křivky. Data získaná při cyklické rotaci a slicing modelu jsou tedy proložena křivkou gauss1 (obr. 13), jenž je argumentem funkce *fit*, obsažené v balíku Curve fitting toolbox. Použitím této funkce na data každé z kombinací rotace osy X a Y vznikne matice aproximovaných křivek o velikosti ($n \times 1$), kde n značí počet aproximovaných průběhů, tj. $(360^\circ/\alpha)^2$. Struktura části programu zajišťující aproximaci dat získaných při cyklickém slicing modelu:

```
%Deklarace bodu na ose X
x_max = size(area,2);
x_vals = 0:slice_height:(x_max*slice_height)-slice_height;
%Zjisteni poctu jednotlivych aproximovanych prubehu
poly_n = size(area(:,1));
poly_n = poly_n(1);
p{poly_n} = 0;
S{poly_n} = 0;
%Cyklicka aproximace dat
for k = 1 : 1 : poly_n
    [p{k} S{k}] = fit(x_vals', area(k,:)','gauss1');
    if (info_out)
        str = sprintf('Curve fitting %i/%i ',k,poly_n);
        disp(str);
    end
end
```


Díky Curve fitting toolboxu lze u každé aproximované křivky určit i takzvaný *goodness of fit*, tj. údaje o kvalitě aproximace. Ačkoliv se v této struktuře nachází až 6 statistických parametrů, pro úspěšné porovnání aproximovaných křivek a výběr nejvhodnější kombinace rotací osy X a Y je využit pouze jeden. Parametr R-square, udávající procentuální shodu vstupních dat a aproximované křivky. Pomocí tohoto parametru lze vybrat průběh nejvíce se shodující s Gaussovou křivkou a označit jej za optimální. R-square je nejdříve cyklicky pro každou aproximovanou křivku přepsán do samostatné matice pro usnadnění při dalším možném zpracování

```
for k = 1 : 1 : poly_n
    r_squares(k) = S{k}.rsquare;
    if (info_out)
        str = sprintf('Comparing %i/%i - Result: %d',k,poly_n,S{k}.rsquare);
        disp(str);
    end
end
```

a následně je vybrána nejvyšší hodnota z této matice. Přesnost aproximace se ve většině případů pohybovala ve vyšších desítkách procent, pro výběr nejvyšší shody však bylo nutné rozšířit počet desetinných míst při výpočtech, jelikož se u nejlépe aproximovaných průběhů shodovaly v některých případech R-square parametry až v šesti desetinných místech. Pro dosažení maximální přesnosti a eliminaci více shodných výsledků je na počátku rozšířen počet desetinných míst při všech výpočtech na 32 [19].

```
[val, idx] = max(r_squares);%Vyber nejvyssi shody s prolozenou krivkou
if (info_out)
    str = sprintf('Best result %i',idx);%Informace o indexu optimalniho vysledku
    disp(str);
```

Z matice *r_squares* je zjištěn index optimálního natočení dle osy X a Y a podle tohoto indexu je z matic *x_rot* a *y_rot*, obsahujících jednotlivé kombinace úhlu natočení vybrána příslušná hodnota. Model je následně dle těchto hodnot rotován a výsledná poloha, jenž lze považovat za optimální, je zobrazena na 3D grafu. Následně je na nový 2D graf vykreslen optimální průběh plochy, proložený Gaussovou křivkou.

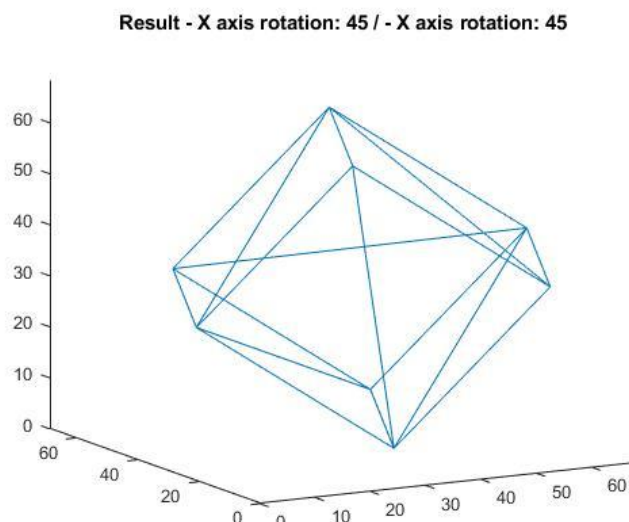
```

%Natoceni dle osy X
triangles = rotate_stl(triangles,'x',x_rot(idx));
%Natoceni dle osy Y
triangles = rotate_stl(triangles,'y',y_rot(idx));
v = reshape(triangles(:,1:9)',3,size(triangles,1)*3)';
%Vykresleni optimalni polohy pro tisk do 3d grafu
figure;
plot_stl(v);
title(['Result - X axis rotation: ' num2str(x_rot(idx)) ' / - X axis
rotation: ' num2str(y_rot(idx))]);
%Vykresleni prubehu plochy a aproximace u optimalniho natoceni
figure;
plot(p{idx}, x_vals, area(idx,:));
title('Data aproximation');
xlabel('Z axis height [mm]');
ylabel('Area [mm^{2}]');

```

Skript byl vyvinut jako jednovláknový, s použitím Parallel computing toolboxu lze však realizovat stejný algoritmus, využívající více procesorových jader, čímž by bylo možné dosáhnout několikanásobně vyšší rychlosti výpočtu, a tedy i možnost použití velice malých hodnot rotace modelu či výšky slicingů. Při snaze o implementaci této technologie do skriptu v pozdní fázi vývoje však vzniklo několik problémů souvisejících s alokací paměti pro proměnné a přidělováním přístupu k nim jednotlivým jádřům. Z časových důvodů tedy nebyl algoritmus umožňující paralelní běh dokončen.

Pro první zkoušky algoritmu byl zvolen stejný model krychle, jako při počáteční analýze jednotlivých metod polohování. Výška vrstvy při slicingů byla nastavena na 0,1 mm (standard u Sinterit Lisa Pro) a úhel rotace $\alpha = 15^\circ$. Program po výpočtu vyhodnotil u krychle jako optimální polohu rotaci o 45° v ose X i Y. Krychle byla tedy v tiskovém prostoru postavena na vrchol (obr. 14). Použití algoritmu na jednoduchý geometrický útvar prokázalo jeho snahu o docílení optimální polohy s rozvojem plochy v ideálním případě kopírujícím Gaussovu křivku. Shoda reálných dat a aproximované křivky dosáhla hodnoty 99,76 % (obr. 13). Algoritmus tedy mohl být označen za funkční, nicméně bylo nutné jej vyzkoušet na složitějších konstrukčních dílech, aby se mohla prokázat jeho efektivita při praktickém použití.



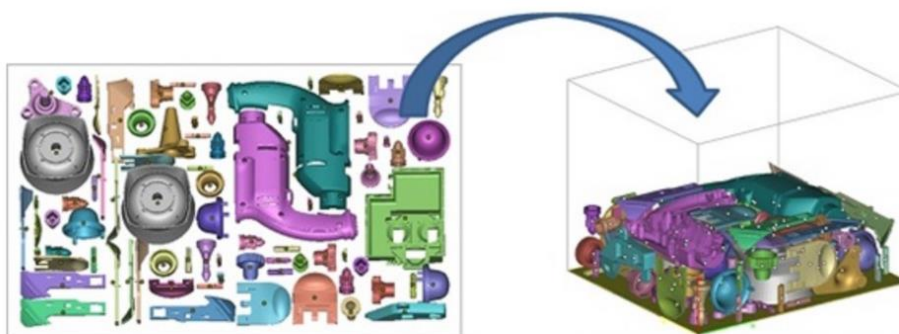
Obrázek 14 – Optimální poloha krychle pro tisk pomocí SLS

4.8 Testování algoritmu na prakticky využitelných dílech

Realizovaný algoritmus prošel testováním s použitím jednoduchého modelu krychle. Díky malému počtu trojúhelníků v modelu proběhla analýza relativně rychle a průběhy plochy získané slicingem lze velice snadno aproximovat. Podobnost aproximovaných křivek dosahovala až na několik případů vyšší desítky procent. Jako nejhorší výsledek se ukázal průběh plochy při orientaci krychle na celou stranu. V tomto případě rozvoj plochy nabývá formu konstantní funkce a přesnost proložení Gaussovou křivkou se pohybovala v těchto případech kolem 40 %. Díky tomuto výsledku byla analyticky potvrzena nevhodnost vypalování velkých ploch do jednotlivých vrstev prášku, jenž byla zjištěna před realizací optimalizačního software tiskem totožného modelu několika různými způsoby polohování.

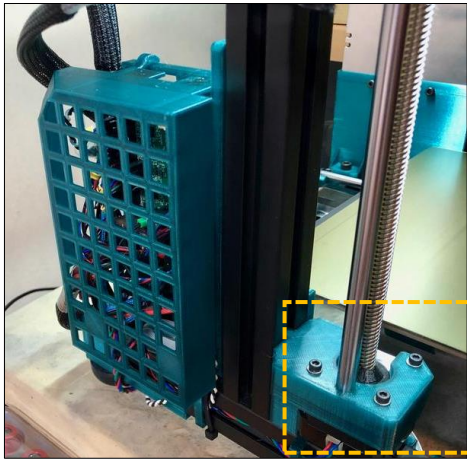
Ačkoliv se algoritmus ukázal jako funkční, nedošlo doposud k jeho otestování na prakticky využitelných modelech. U takových dílů se model většinou skládá z velkého množství trojúhelníků, obsahuje velké množství hran a pro dosažení optimální kvality tisku jej lze polohovat několika různými způsoby.

Realizovaný algoritmus by měl tuto volbu usnadnit při použití v laboratoři, kde byl doposud softwarově řešen pouze nesting, tj. umístění mnoha tištěných dílů do tiskového prostoru tak, aby jich bylo možné vytisknout během jednoho tiskového procesu co nejvíce (obr 15). Individuální přístup k jednotlivým dílům však nebyl realizován, polohování před nestingem tedy probíhalo ručně.

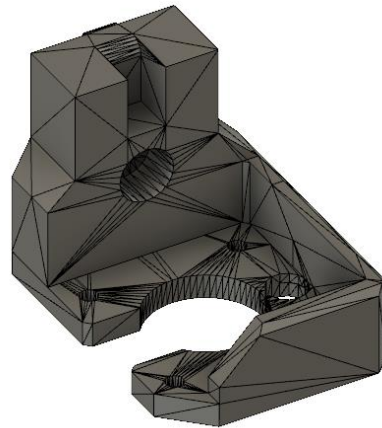


Obrázek 15 – Princip nestingu [20]

Pro ověření optimalizačního algoritmu na funkčních dílech byly zvoleny dva modely. Prvním z nich je konstrukční díl používaný při stavbě hobby 3D tiskárny, sloužící k uchycení krokového motoru k rámu tiskárny (obr. 16, 17). Na tento motor je připevněn trapézový šroub, pomocí kterého je manipulováno s osou Z. Jelikož se jedná o kartézský systém tiskárny, dochází k vyššímu namáhání dílu z důvodu hmotnosti osy X, upevněné na trapézových šroubech. Díl byl zvolen pro otestování algoritmu z důvodu jeho primárního určení pro tisk pomocí technologie FFF a při testování lze tedy nejen určit funkčnost algoritmu, ale i porovnat výhody a nevýhody výroby prototypů pomocí technologie SLS a FFF. Doba tisku jednoho kusu trvala při výšce vrstvení 0,1 mm deset hodin proti dvěma hodinám na FFF tiskárně. Díl je však robustnější, méně pružný a přenos vibrací je minimální. Destrukční zkoušky však nebyly provedeny, objektivní porovnání mechanických vlastností tedy v tomto textu není možné.

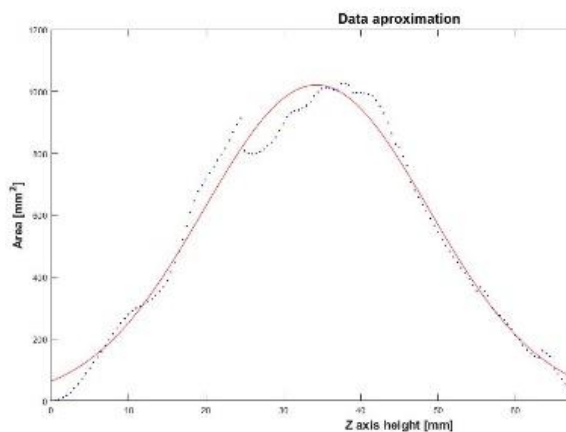


Obrázek 16 – Díl po montáži (FFF)

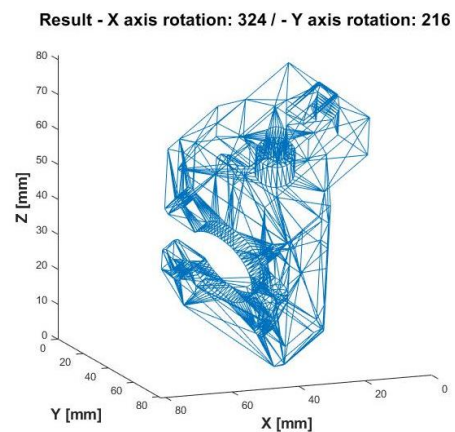


Obrázek 17 – CAD model dílu

Vytištěny byly dva kusy, jeden polohovaný ručně technikem laboratoře a druhý s použitím realizovaného algoritmu. Doporučené rotace osy X a Y dle optimalizačního software měly hodnoty $\text{rotX} = 324^\circ$ a $\text{rotY} = 216^\circ$ (obr. 19). Model byl rotován v každém cyklu o 18° , celkově tedy dvaceti různými způsoby v rámci jedné osy. Počet kombinací rotace XY dosáhl 400. Při polohování dílu před tiskem je důležité dodržet sled rotací, tedy nejprve pootočit model dle osy X a následně dle Y. Opačný postup by vedl k jinému rozvoji plochy při tisku a neodpovídal by tedy optimální křivce.



Obrázek 18 – Průběh plochy vrstev



Obrázek 19 – Optimální poloha při tisku

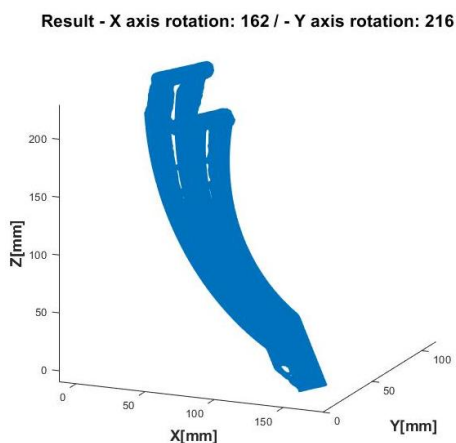
Při volbě druhého modelu vznikla myšlenka otestovat algoritmus na topologicky optimalizovaných dílech. Možnost tisku dílů odlehčených pomocí topologické optimalizace by měla být hlavní výhodou práškových technologií, jelikož okolní prášek slouží jako podpůrná struktura. Princip této optimalizace spočívá v softwarové úpravě CAD modelu, kdy jsou uživatelem nastaveny všechny, funkci modelu ovlivňující parametry, jako je ukotvení dílu nebo jeho silové zatížení. Software následně vypočítá

úpravu modelu tak, aby při zachování stejné funkčnosti dílu došlo k maximálnímu snížení jeho hmotnosti. Typickým výsledkem je odlehčení výrobku až o 30 %. Těchto optimalizačních metod se dnes využívá ve všech sférách průmyslu, nejvíce znatelný dopad má tato technologie na průmysl letecký a automobilový, kde je kladen důraz na co největší redukci hmotnosti [21]. Pro účely testování realizovaného software byl po domluvě s Ing. Michalem Ackermannem, Ph.D. použit topologicky optimalizovaný model pedálu do závodního monopostu (obr. 20). Pedál byl nejprve vymodelován v CAD software a poté následně optimalizován pro maximální snížení hmotnosti.

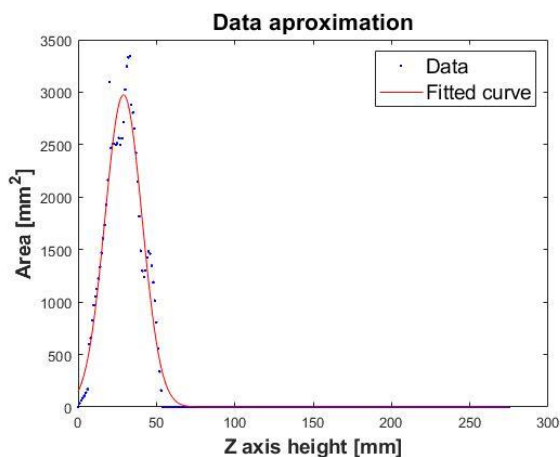


Obrázek 20 – Topologicky optimalizovaný model pedálu

Optimální analyticky zjištěná poloha pro tisk pedálu se ukázala jako rotace dle osy X o 162° a dle Y o 162° (obr. 21). Po aplikaci těchto úhlů byl pedál v tiskovém prostoru otočen a postaven na vrchol v místě plochy určené na jeho sešlápnutí.



Obrázek 21 – Optimální poloha při tisku



Obrázek 22 – Průběh plochy vrstev

U pedálu byly dodrženy stejné parametry tisku jako u krychle nebo konstrukčního dílu 3D tiskárny a vytištěny byly dva kusy, jeden opět polohován technikem laboratoře a druhý polohován algoritmem. Ručně polohovaný díl nebyl otočen o 180° dle osy X,

stavba výtisku tedy probíhala směrem od úchytů na šrouby pedálu. Model musel být pro tisk zmenšen na 70% původní velikost z důvodu malých rozměrů tiskového prostoru, což se poprvé projevilo jako omezující okolnost. Velikost tiskového prostoru je právě jedním z největších nevýhod SLS technologie, jelikož v každé tiskárně vzniká potřeba dvou identických komor, z nichž jedna slouží pouze jako zásobník na prášek. V případě potřeby většího tiskového prostoru je tedy nutné pořídit několikanásobně dražší průmyslovou tiskárnu, jenž je také mnohem prostorově náročnější.

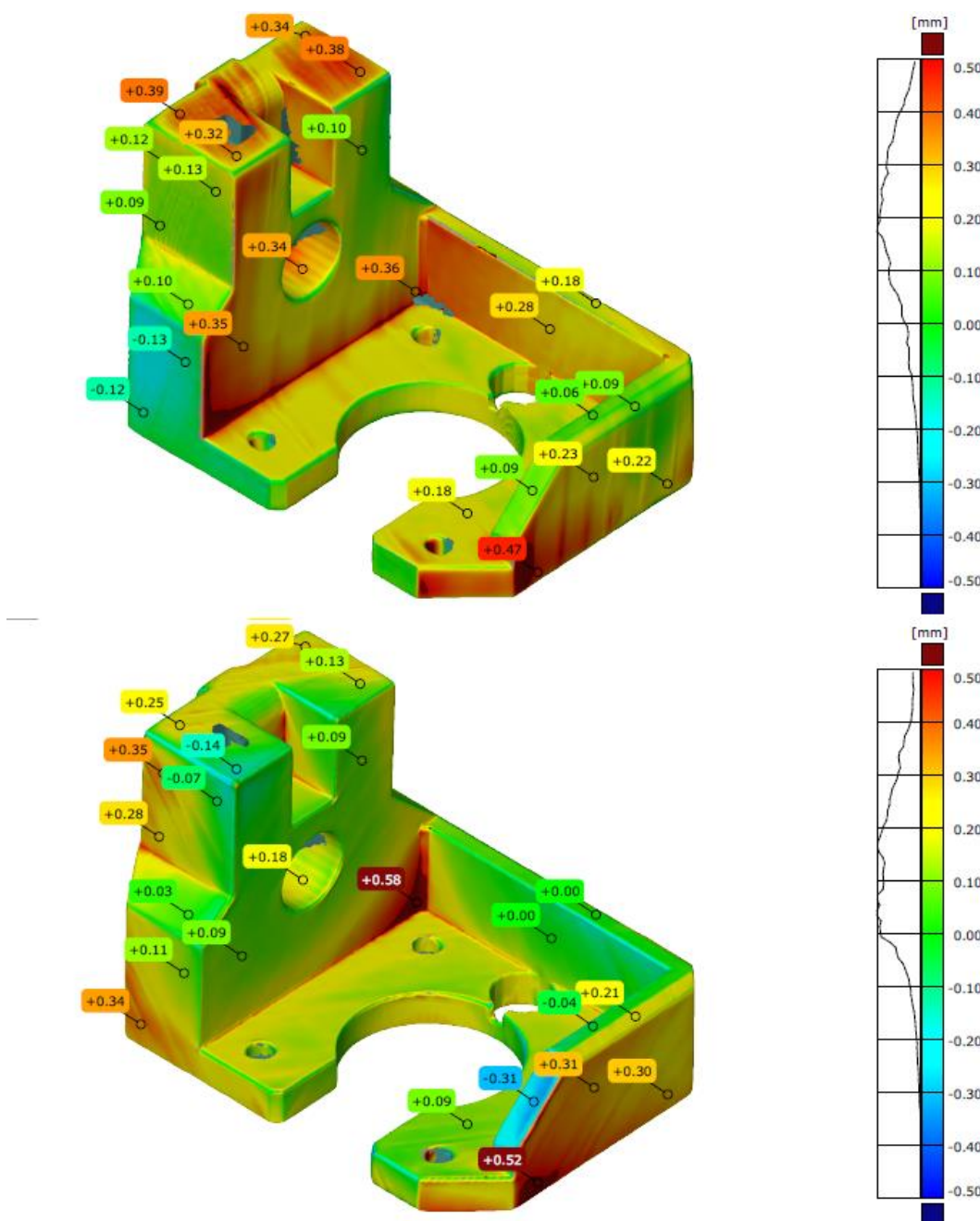
4.9 Porovnání rozměrové přesnosti testovacích výtisků

Objektivní srovnání výtisků proběhlo v laboratoři 3D měření a digitalizace na Katedře výrobních systémů Fakulty strojní. Pro zjištění rozměrové přesnosti byl využit 3D skener Triplescan od společnosti Atos. Výtisky byly nasnímány ze všech stran a následně v software Atos Professional, dodávaném ke skeneru, porovnány s CAD modelem. Výsledky u prvního ze skenovaných modelů, krychle, přinesly důležité informace týkající se vlivu polohování modelu na kvalitu výtisku [22].

U modelu konstrukčního dílu na 3D tiskárnu se funkce optimalizačního algoritmu výrazně projevila na rozměrové přesnosti. S výjimkou několika nerovností na výtisku, způsobených recoaterem tiskárny, lze vidět na výsledcích z 3D skeneru posun hodnot na stupnici odchylek minimálně o 0,15 mm (obr. 23). Tohoto zlepšení bylo docíleno díky optimálnímu rozvoji plochy při tisku. Při správném natočení modelu lze také snížit chybu opakovatelnosti laserové hlavy, jenž slouží ke spékání prášku.

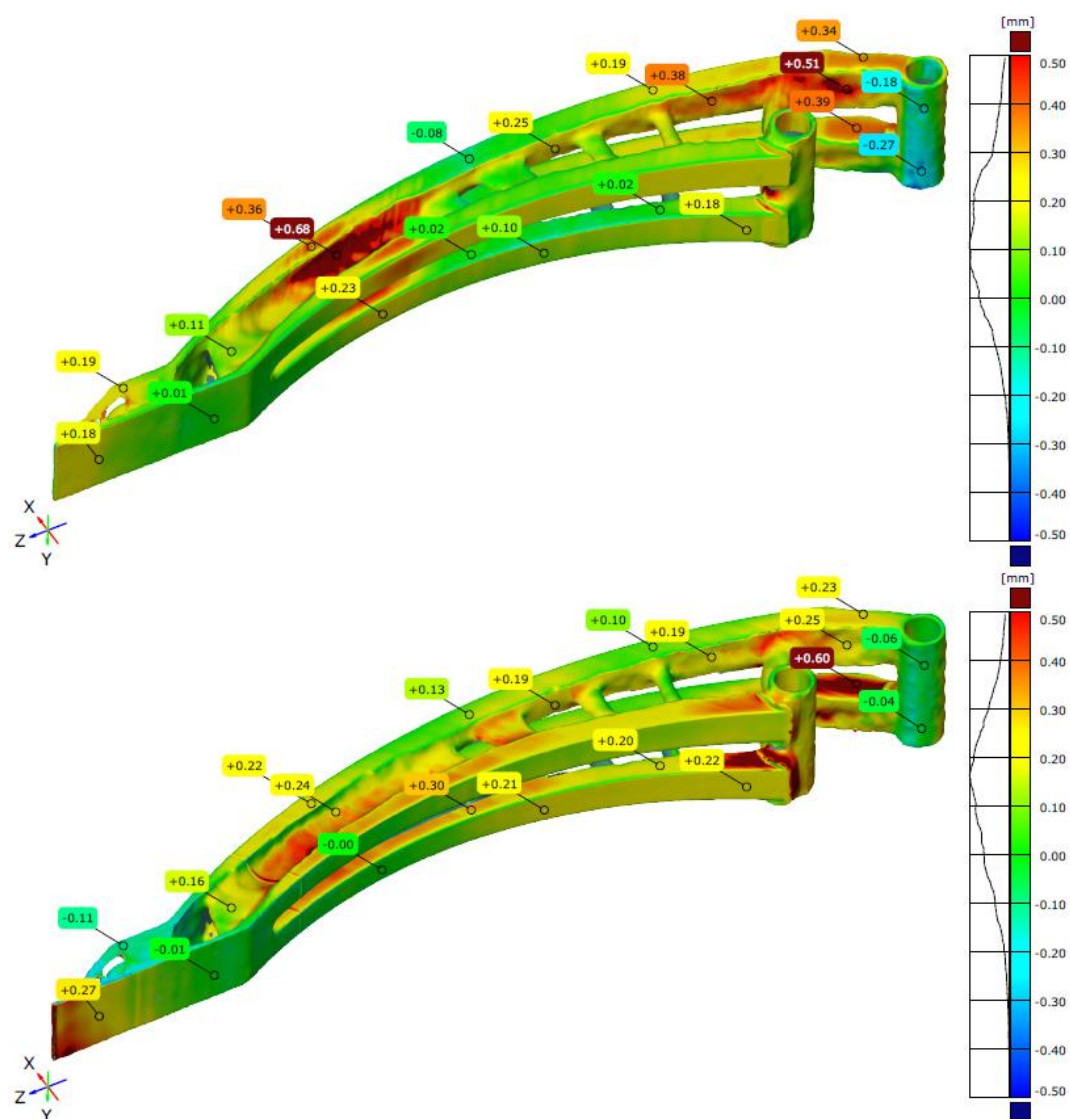
V případě topologicky optimalizovaného dílu nedošlo k výraznému zlepšení, jelikož v modelu nedosahuje plocha jednotlivých vrstev hodnot dost vysokých na to, aby byla ovlivněna kvalita výtisku (obr. 24).

4.10 Srovnání rozměrové přesnosti konstrukčního dílu 3D tiskárny



Obrázek 23 – Shora: Model konstrukčního dílu polohovaný ručně a s použitím algoritmu

4.11 Srovnání rozměrové přesnosti topologicky optimalizovaného dílu



Obrázek 24 – Shora: Model pedálu polohovaný ručně a s použitím algoritmu

5 Závěr

Cílem této práce bylo vyvinout optimalizační algoritmus, který navrhne optimální natočení 3D modelu pro tisk pomocí technologie SLS. Funkčnost algoritmu byla ověřena na několika testovacích výtiscích, jenž byly naskenovány 3D skenerem pro účely srovnání rozměrové přesnosti.

Z porovnání výsledků 3D skenování bylo zjištěno u modelu konstrukčního dílu výrazného zlepšení rozměrové přesnosti dílu. Na testovacích výtiscích se také snížilo množství nerovností povrchu, způsobených tiskárnou, a tudíž bylo dosaženo vyšší estetické kvality výtisku. U topologicky optimalizovaného dílu se již zlepšení tak znatelně neprojevovalo. Vzhledem k principu funkce algoritmu se tento výsledek dal očekávat, jelikož algoritmus analyzuje rozvoj plochy výtisku v jednotlivých vrstvách. Díly po topologické optimalizaci mají tyto plochy podstatně menší než klasické konstrukční díly a po automatickém polohování algoritmem se zlepšení neprojeví tak výrazně. Pro tisk klasických konstrukčních dílů pomocí práškových technologií se však realizovaný algoritmus ukázal jako funkční pomůcka, jenž usnadní technikovi laboratoře přípravu dat na tiskový proces.

Výroba topologicky optimalizovaných prototypů se zároveň ukázala jako neefektivnější využití pro technologii SLS. Díky podpůrné funkci okolního nespečeného prášku lze poměrně snadno tisknout struktury, které by při použití jiných rapid prototyping technologií byly velice těžko realizovatelné. Nevýhodou technologie je však délka tisku, pokud je tedy požadovaný prototyp konstrukčně jednoduchý, stává se použití technologie SLS neefektivní a je lepší volit technologii jinou, například FFF. SLS však tento nedostatek kompenzuje nadprůměrnými mechanickými vlastnostmi výtisků proti jiným technologiím.

Optimalizační algoritmus byl realizován ve formě skriptu v software Matlab. Pokud by bylo v jeho vývoji pokračováno, nabízí se jako první vylepšení zprovoznění paralelizace, čímž by bylo možné optimalizaci několikanásobně urychlit. Dalším možným krokem je také realizace front end interface, pro uživatele neznalé software Matlab, jenž umožní snadné ovládání bez nutnosti změny parametrů optimalizace přímo v kódu.

6 Citovaná literatura

- [1] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 2003. ISBN 978-981-238-120-0.
- [2] GROSVENOR, Carol a Alex LOU. Selective Laser Sintering: Birth of an Industry. *The University of Texas* [online]. 2012 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry#ch4>
- [3] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. 1st. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2004. ISBN 0-87263-697-6.
- [4] FARIN, Gerald E., Josef HOSCHEK a Myung-Soo KIM. *Handbook of computer aided geometric design*. 1st. Boston, Mass.: Elsevier, 2002. ISBN 978-0-444-51104-1.
- [5] Slic3r. *Reprap.org* [online]. b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Slic3r>
- [6] Ultimaker Cura: Advanced 3d printing software, made accessible [online]. Ultimaker BV, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>
- [7] 3D printing software / Simplify3D [online]. Simplify3D, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/>
- [8] HEINDL, Michal. *3D tisk*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. Petr Řezáček, Ph.D.
- [9] *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. b.r. US4575330A.
- [10] The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. *Formlabs*. [online]. Formlabs, Inc., 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#sla-systems>
- [11] KIM, Guk Bae, Sangwook LEE, Haekang KIM et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J Radiol*. The Korean Society of Radiology, 2016, **17**(2), 182-197. ISSN 1229-6929. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>
- [12] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, 2010. ISBN 9781441911193.
- [13] *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications*. 1st edition. Cambridge, CA: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812155-9.
- [14] TAUFİK, Mohammad a Prashant JAIN. *Role of build orientation in layered manufacturing: A review: A review*. 2014, **27**, pp.47. DOI: 10.1504/IJMTM.2013.058637.
- [15] FRASCATI, Joseph. *Effects Of Position, Orientation, And Infiltrating Material On Three Dimensional Printing Models*. Orlando, Florida, 2007. Master thesis. University of Central Florida.

- [16] DONG, L., N. BARTH, J. P. M. CORREIA a S. AHZI. Modeling and numerical simulation of selective laser sintering. In: *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/EuroSimE.2016.7463376.
- [17] Meet Sinterit Lisa Pro. *Sinterit* [online]. b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.sinterit.com/sinterit-lisa-pro/>
- [18] Slice_stl_create_path(triangles,slice_height): slice stl files and create continuous contour along the slices. *File Exchange: Matlab central* [online]. b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62113-slice_stl_create_path-triangles-slice_height
- [19] Curve Fitting Toolbox. *MathWorks* [online]. b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>
- [20] Nesting for 3D Printing (SLS). *Autodesk Fusion 360 forums* [online]. b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://forums.autodesk.com/t5/fusion-360-ideastation/nesting-for-3d-printing-sls/idi-p/7967548>
- [21] KOPŘIVA, Lubomír. *Optimalizace žebra v křídle letounu*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [22] DOKOUPIL, FILIP. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. b.r. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Paloušek, Ph.D.

7 Obsah příloženého CD

- Text bakalářské práce
 - Bakalarska_prace_Zoltan_Dolensky_2019.pdf
- Skripty ze software Matlab
 - read_binary_stl_file.m
 - slice_stl.m
 - rotate_stl.m
 - plot_stl.m
 - Actl.m
- 3D modely testovacích výtisků
 - 40mmcube.stl
 - 1x_z_motor_mount_right_SSE.stl
 - Pedal_light.stl